

# 論文 直流四電極法による養生終了判定時期判定方法の確立および現場適用性の検討

三坂 岳広\*1・原沢 蓉子\*2・伊代田 岳史\*3

**要旨:** 鉄筋コンクリート構造物に必要とされるコンクリートの強度や耐久性を満足するためには、十分な養生を行う必要がある。近年、養生による表層コンクリートの品質を測定する方法が提案されているが、養生期間中にその品質を測定する方法は無く、したがって、養生終了時期を判定する方法も無い。本研究では、養生期間中のコンクリートにおいて電気抵抗を計測し、脱型時の電気抵抗と強度および中性化との関係を確認し、養生終了時期判定手法を提案することができた。また、本手法を現場で使用し、本手法が現場で適用できる可能性があることを確認した。

**キーワード:** 四電極法, 養生, 電気抵抗, 圧縮強度, 中性化, 耐久性, 水和反応

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の主な劣化現象である塩害や中性化は、塩化物イオンや炭酸ガスがコンクリート表面から内部に浸透することにより引き起こされる。コンクリートの耐久性は、W/C、セメントの種類などの材料条件の他に構造物の置かれる環境条件や養生条件に影響を受ける。また、既往の研究<sup>1)2)</sup>では、コンクリートの強度および耐久性と養生期間との関係が明らかになっている。コンクリートの養生は、鉄筋コンクリート構造物に必要とされる耐久性を満足するために重要である。適切な養生が行われなかった場合には、水和反応に必要な水が不足して水和反応が阻害される。この現象は、コンクリート表層から水分逸散するため表層コンクリートにおいて起こる。近年、表層コンクリートの耐久性は、空気透過試験（トレント法）や透水性試験等の非破壊試験で確認されている。しかし、これらの試験方法は、コンクリートの含水率に強く影響を受け、若材齢のコンクリートで計測を行うことは難しい。したがって、型枠保持期間中にコンクリートの圧縮強度や耐久性を養生期間中に予測することは困難であり、脱型後に評価されるのが現状である。現在、現場で一般的に用いられる養生方法として、型枠存置による封かん養生が挙げられる。コンクリート標準示方書【施工編】では、型枠を取り外してよい時期のコンクリート圧縮強度の参考値<sup>3)</sup>を示している。この圧縮強度は、コンクリートがその自重および施工期間中に加わる荷重を受けることを考慮したものである。また、養生に関する記載には、湿潤期間の標準<sup>3)</sup>を日数で示している。この日数は、日平均気温とセメントの種類によって定められている。コンクリートに要求される耐久性は、セメントの種類や日平均気温の他に、鉄筋か

ぶりの大きさ、W/Cなどに影響を受けると考えられる。また、湿潤養生期間についても日射や湿度などの施工環境および構造物の断面などに影響を受け、コンクリート構造物の部分ごとに異なることが考えられる。養生終了時期は型枠脱型時に必要な強度を確保するだけでなく、コンクリート構造物に要求される耐久性や強度等の性能から設定されるのが理想である。電気抵抗法は、かぶりコンクリートの電気抵抗を計測することによって、その腐食性および鉄筋の腐食進行のしやすさについて評価する電気的方法である<sup>4)</sup>。また、コンクリートの含水率の測定にも用いられている。一般的に水分が多く電気が通りやすいと電気抵抗は小さくなり、水分が少なく電気が通りにくいと電気抵抗は大きくなる。筆者らは、直流四電極法による電気抵抗計測に着目し、研究を行ってきた<sup>5)6)</sup>。直流四電極法により計測される電気抵抗値を用いてコンクリート内部の水分量を計測し、水和反応の進行程度を評価することを考えた。本論文はコンクリートの電気抵抗値から養生終了時期を判定する方法を提案し、さらに、本方法を実際に現場で計測を行った結果を示す。

## 2. 実験方法

本実験では実験室内で実験を行ったシリーズA、生工場の試験室で施工前に行われた試験練りで、実際の現場に使用するコンクリートを用いて実験を行ったシリーズB、現場の実構造物で計測を行ったシリーズCという3種類の実験を行った。シリーズCの実験は、東京都町田市の現場屋外で作製される逆T型擁壁に実際に電極を設置して測定を行った。シリーズCの逆T型擁壁の概略を図-1に示す。計測位置は図中に示す擁壁縦壁とした。圧縮強度試験はJISに準拠して行った。促進中性化

\*1 佐藤工業（株） 技術研究所（正会員）

\*2 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻（学生会員）

\*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科 准教授 博士 工博（正会員）

表-1 電気抵抗の計測条件

	シリーズ A	シリーズ B, C
計測方法	直流四電極法	
印加電圧	10V(パルス波)	
電極間隔	40mm	50mm
通電深さ	30mm	50mm
電極金属	鉄	ステンレス

表-2 コンクリートの配合

	セメント 種類	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
						W	C	S	G
シリーズ A	N	11.0	45	4.0	46	172	382	808	971
		14.0	55	5.9	48		313	869	968
		10.0	65	3.9	50		265	928	949
シリーズ B, C		13.5	54	5.5	45		317	812	989

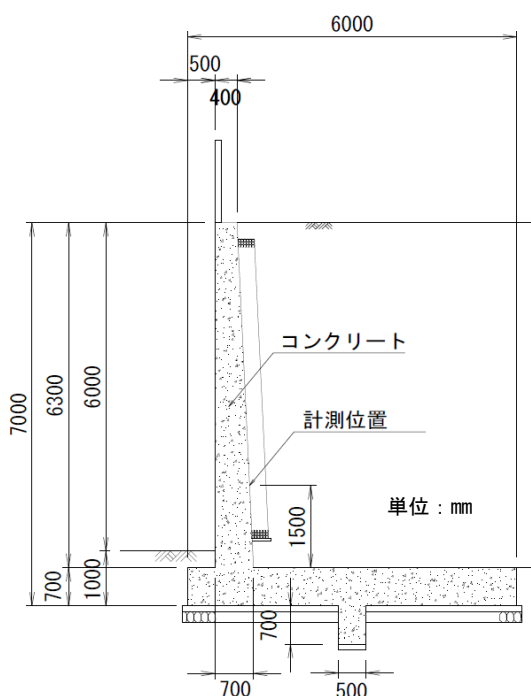


図-1 逆T型擁壁の概略

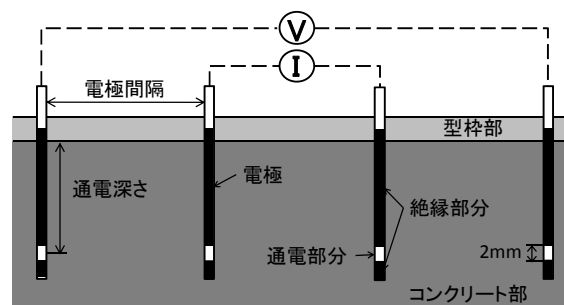


図-2 直流四電極法の概略

養生期間	材齢(日)									
	0	1	3	5	7	~	28	~	91	
1日	圧						圧			圧
3日		圧					圧			圧
5日			圧				圧			圧
7日				圧			圧			圧
28日							圧			圧
91日										圧

■ : 封かん養生(20°C) □ : 屋内暴露(20°C,60%RH) - - - : 脱型  
 圧: 圧縮強度試験

図-3 養生方法の概略(シリーズA, 圧縮強度試験用)

試験の供試体は、100×100×400mmの角柱供試体を用い、中性化深さ測定面以外をアルミテープで覆い二酸化炭素の侵入を防いだ。また、測定面は各種養生期間中にラップフィルムで覆うことにより、封かん養生とした。供試体の前養生は、各種養生を終了後、温度 20±2°C、相対湿度 60±5%の環境で材齢 56 日まで静置した。その他の試験条件は JIS に準拠した。電気抵抗の測定は、コンクリートの打設直後から経時的に計測を行っている。

### 2.1 直流四電極法による電気抵抗計測

直流四電極法の概略を図-2 に示す。本計測方法の特徴は、コンクリート内部に埋め込まれる電極の表面を絶縁体で覆うことにより通電部を設けることである。これにより通電深さを変化させ、コンクリート表面からの距離ごとの電気抵抗計測が可能となる。表-1 に電気抵抗の計測条件を記す。直流電源を使用した理由として、交流電源と比較して計測装置が小型で安価なことが挙げられる。また、パルス波を使用することで帯電現象を防止している。電極の金属には、シリーズAでは鉄を使用し、シリーズBおよびシリーズCではステンレスを使用している。ステンレスを使用した理由は、コンクリートの表

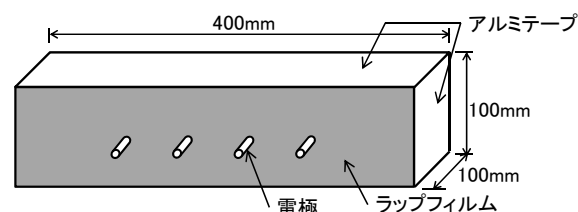


図-4 電気抵抗計測用供試体の概略

面を錆汁等で汚さないためである。

### 2.2 配合および養生方法

供試体を使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。表中のスランブと空気量は実測値である。シリーズAの供試体のW/Cは、45、55、65%と変化させた。シリーズBおよびシリーズCの配合は、生コン工場で製造され、27-12-20N で表記される一般的なコンクリートである。コンクリートの使用材料は、シリーズBとシリーズCで同じだが、シリーズAは異なる。単位水量は、すべての配合で172kg/m<sup>3</sup>で一定である。図-3に養生方法の概略(シリーズA, 圧縮強度試験用)を示す。すべての供試体の型枠は、材齢1日で脱型した。供試体の養生期間は

1, 3, 5, 7, 28, 91 日に設定し、養生終了時に圧縮強度を測定している。促進中性化試験で使用した供試体の封かん養生期間は、1, 3, 5, 7, 28 日となっている。シリーズ B は、図-3 内の封かん養生期間 1, 3, 7, 28 日の供試体を作製し、同様の養生を行った供試体に対し、圧縮強度試験および促進中性化試験を行った。シリーズ C は、型枠存置による封かん養生を行った。また、型枠の脱型は、材齢 6 日で行った。シリーズ A およびシリーズ B で作製した電気抵抗計測用供試体の概略を図-4 に示す。養生方法は、封かん養生期間中に供試体のすべての面をラップフィルムとアルミテープで覆い、水分の蒸発を防止した。封かん養生終了時には、図中のラップフィルムを除去し、供試体の一面のみを開放した。供試体は恒温恒湿室（温度： $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $60 \pm 5\% \text{RH}$ ）内に静置した。シリーズ C は現場の屋外環境であり、外気温を計測した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 シリーズ A

##### (1) 圧縮強度試験および促進中性化試験結果

図-5 に W/C が 55% の供試体の圧縮強度試験結果を示し、図-6 に促進材齢 4 週の促進中性化試験結果によって算出された中性化速度係数を示す。圧縮強度は養生期間が長くなるほど大きくなった。また、中性化速度係数は、養生期間が短いほど大きくなった。この傾向は既往の研究<sup>1)</sup>と同様である。

##### (2) 電気抵抗計測結果

図-7 に封かん養生期間中の電気抵抗計測結果を示す。材齢 3 日までの初期材齢において各 W/C の電気抵抗は、同じ値を示している。しかし、材齢の進行に伴って W/C の小さいコンクリートほど電気抵抗値は大きな値を示した。原因として、コンクリートの単位水量は各 W/C で一定としており W/C の小さなコンクリートほどセメントの使用量が多い。したがって、W/C の小さなものほど水和反応に使用される水の量が多くなりコンクリート内部の水分量が少ないと考えられる。また、W/C の小さいコンクリートほどセメント硬化体組織が緻密化するため、電気が流れにくい状況と考えられる。

##### (3) 養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を図-8 に示す。図から養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗との間に相関関係が認められ、W/C の異なるコンクリートでもほぼ同じ傾きの直線を示している。この結果は、養生期間中のコンクリートの電気抵抗を測定することにより、W/C の大小に関係なく電気抵抗計測時の強度が推定できる可能性を示している。よって、実

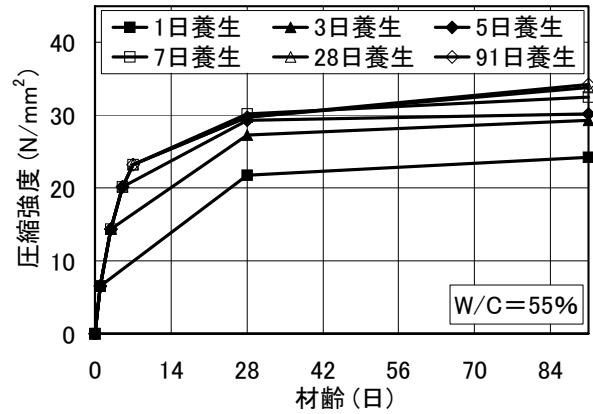


図-5 圧縮強度試験結果

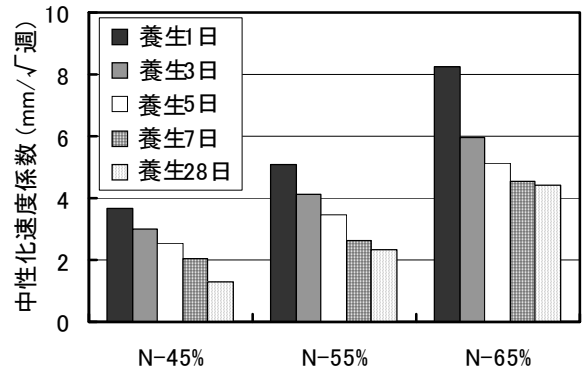


図-6 中性化速度係数

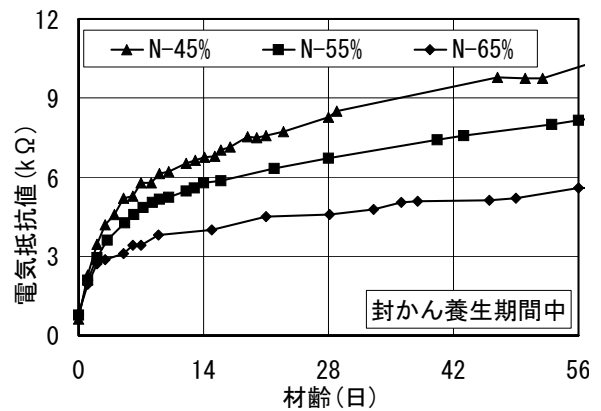


図-7 電気抵抗計測結果

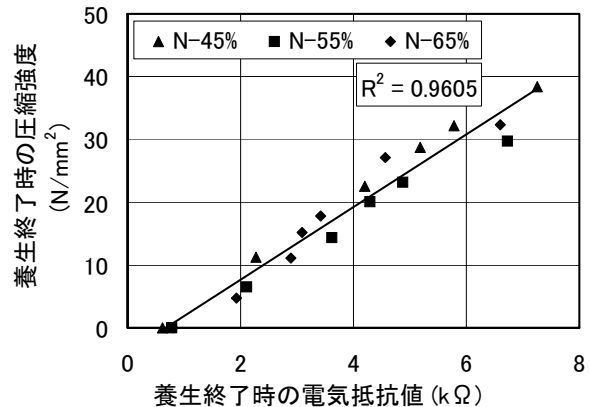


図-8 養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

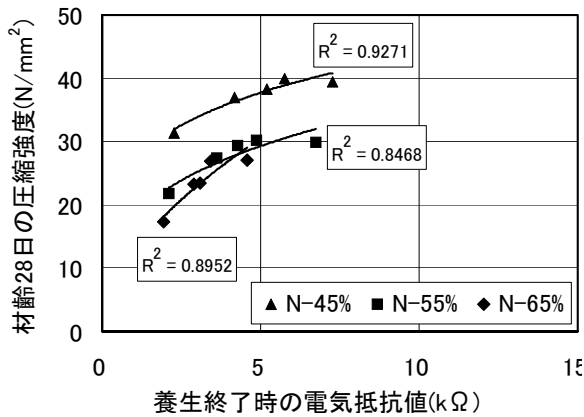


図-9 材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

際の現場で型枠および支保工を取り外す際の指標として活用できる可能性がある。

(4) 材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を図-9 に示す。図から養生終了時の電気抵抗値が大きくなるほど材齢 28 日の圧縮強度が大きくなっており、養生終了時の電気抵抗と材齢 28 日の圧縮強度の間に相関関係が認められる。この図を用いることにより、養生期間中のコンクリートの電気抵抗を計測することで、材齢 28 日の圧縮強度を推定できる可能性が示された。これは、実際の現場において養生終了時期の判定に使用できると考えられる。したがって、材齢 28 日の圧縮強度から養生終了時に必要となる電気抵抗値を設定することにより、養生終了時期の判定ができる可能性が示された。

(5) 材齢 91 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

材齢 91 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を図-10 に示す。図から養生終了時の電気抵抗値が大きくなるほど材齢 91 日の圧縮強度が大きくなっており、養生終了時の電気抵抗と材齢 91 日の圧縮強度の間に相関関係が認められる。この図を用いることにより、養生終了時のコンクリートの電気抵抗を計測することで、材齢 91 日の圧縮強度も推定できる可能性が示された。

(6) 中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係

本実験結果の中性化速度係数は、促進材齢 4 週の促進中性化試験結果から算出されたものである。図-11 に中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係を示す。図から中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗に相関関係が認められ、養生終了時の電気抵抗が大きくなると中性化速度係数が小さくなる傾向が確認できる。この図を用いることにより、養生期間中の電気抵抗を計測することで、現在、養生を終了するとコンクリートが将来的に持つ中性化速度係数を推定できる可能性がある。また、コ

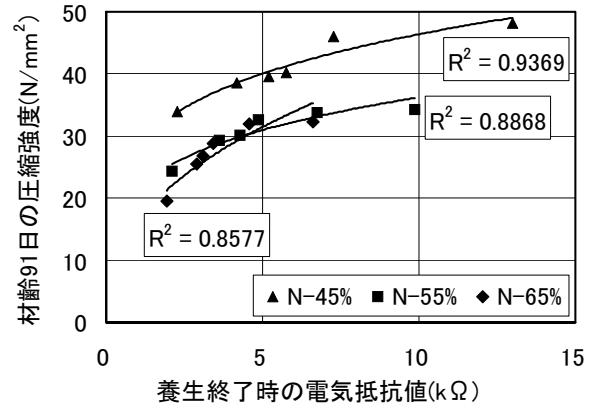


図-10 材齢 91 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

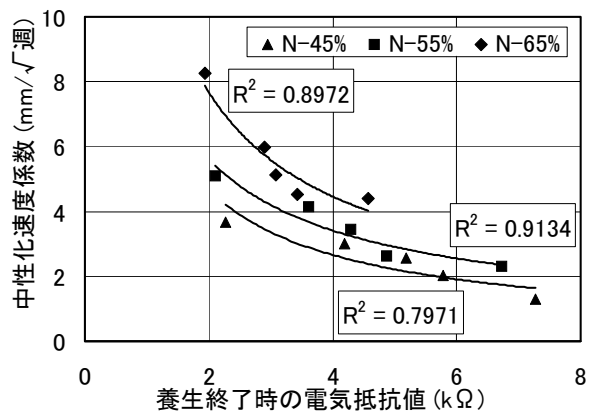


図-11 中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係

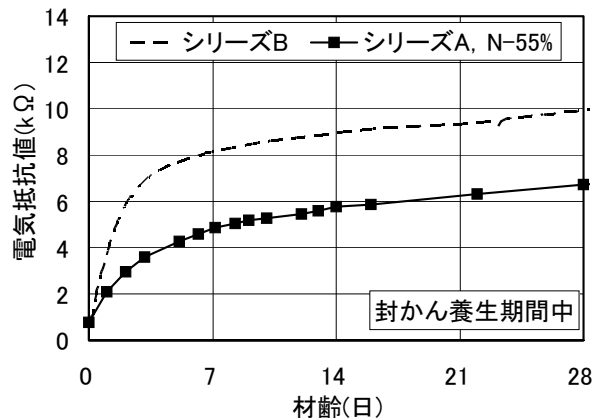


図-12 電気抵抗の測定結果計測結果

ンクリートに要求される中性化速度係数から養生終了時の電気抵抗を設定することで、養生終了時期の判定ができる可能性がある。

3.2 シリーズB

(1) 電気抵抗計測結果

シリーズB で作製した供試体とシリーズA で計測された W/C が 55% の供試体の電気抵抗測定結果を図-12 に示す。図から、電気抵抗は、若材齢でほぼ同じ値を示しているが、材齢の進行に伴って試験練りの電気抵抗値が大きくなっている。原因として、電極の金属が鉄とステ

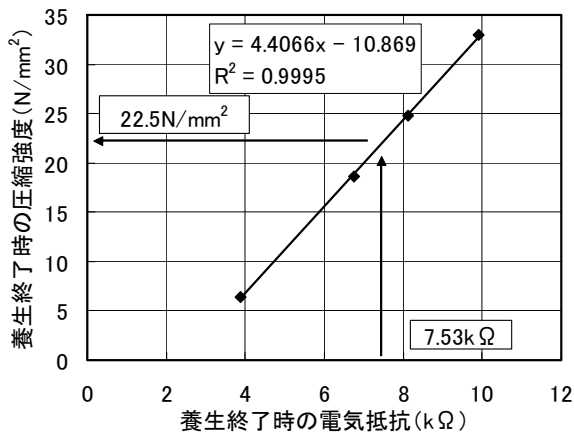


図-13 養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

ンレスで異なり、ステンレスの電気抵抗が鉄より大きいことや、電極の間隔が異なることなどが挙げられる。しかし、どちらの電気抵抗も同じような傾向を捉えており、シリーズ B、C 間で同じ計測方法（電極の金属、電極の間隔）で測定をするなら、強度や耐久性を推定することは可能と考えられる。

### (2) 電気抵抗と圧縮強度および中性化速度係数の関係

養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を図-13に示す。図中の養生終了時の圧縮強度は、圧縮強度の小さいものから順に材齢1日、3日、7日、28日まで封かん養生を行った供試体のものである。材齢28日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を図-14に示す。図中の材齢28日の圧縮強度試験結果は、圧縮強度の小さいものから順に材齢1日、3日、7日、28日まで封かん養生を行った供試体のものである。中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係を図-15に示す。図中の中性化速度係数は、促進材齢4週の促進中性化試験結果から算出した。中性化速度係数の大きいものから順に材齢1日、3日、7日、28日まで封かん養生を行った供試体から算出した結果である。図-13~15は、シリーズAの試験結果と同様の傾向を示しており、電極の間隔、通電深さ、電極の金属を変えても同様の傾向を得ることができた。この図-13~15を用いて、シリーズCの実構造物の計測結果を評価する。

### 3.3 シリーズC

#### (1) 電気抵抗計測結果

シリーズBで作製した供試体を恒温恒湿室内で計測した電気抵抗と、実際に現場の逆T型擁壁で計測した電気抵抗の計測結果を図-16に示す。シリーズBの電気抵抗と現場計測の電気抵抗は、練混ぜ直後に差は認められなかった。しかし、電気抵抗は、材齢の進行に伴ってシリーズBで計測された値より現場計測の値が小さい値を示した。現場計測での電気抵抗と外気温を図-17に示す。

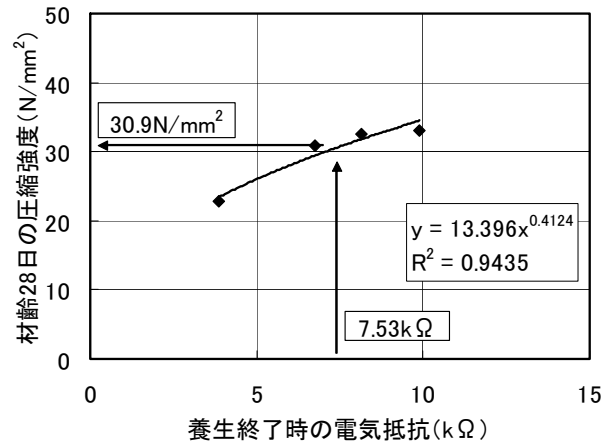


図-14 材齢28日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

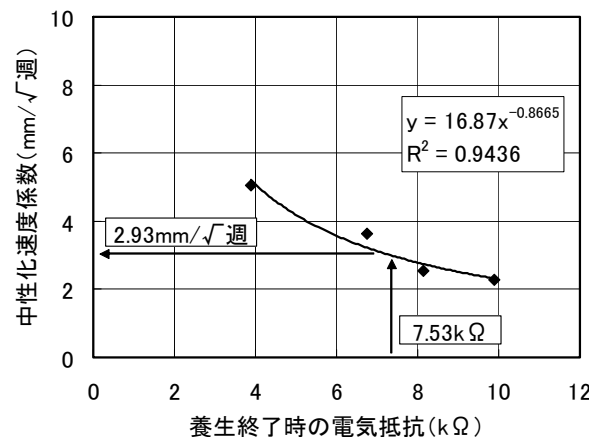


図-15 中性化速度係数の推定

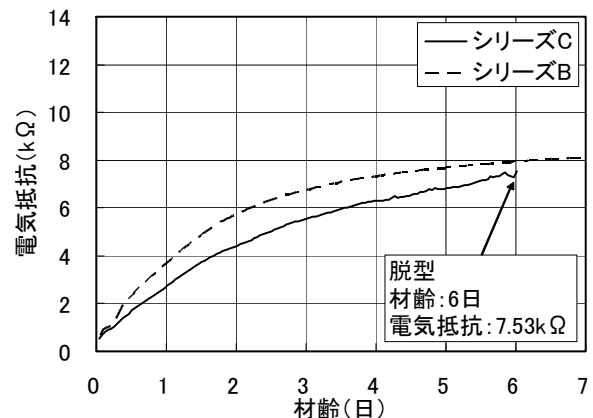


図-16 現場計測と供試体の電気抵抗計測結果

現場計測時の外気温は、平均気温が16.0℃となっており、シリーズBより低い。したがって、試験練りと現場計測での電気抵抗の差異の原因として、計測される電気抵抗が温度環境による水和反応の進行度の違いに影響を受けたことが考えられる。これは、温度等の現場状況によって左右されるコンクリートの水和反応の進行度を反映した結果と考えられ、本手法の有効性を示すものと考えられる。この現場の逆T型擁壁は、材齢6日に脱型された

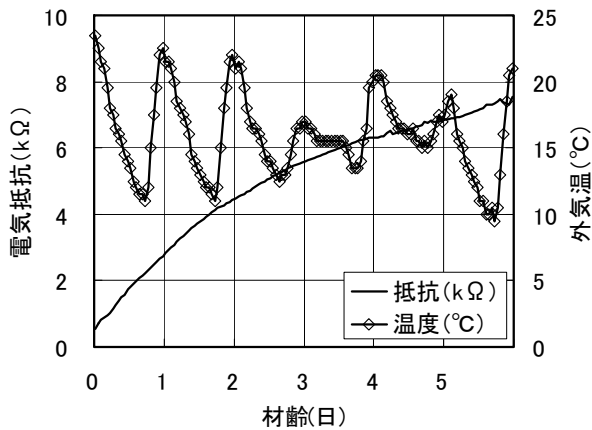


図-17 電気抵抗と外気温計測結果

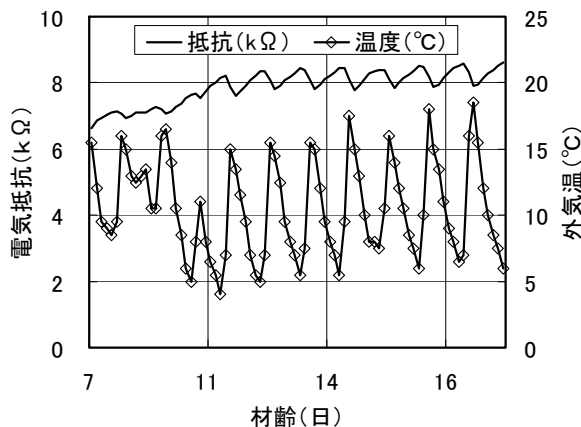


図-18 電気抵抗と外気温計測結果

ことにより養生が終了した。養生終了時の電気抵抗値は  $7.53\text{k}\Omega$  となり、圧縮強度や中性化速度計数は、図-13～15 内の矢印のように算出される。これらの結果から、実際の現場でコンクリート構造物を対象に電気抵抗が計測可能なことを確認した。また、この現場の逆 T 型擁壁は、十分な強度と中性化抵抗性があると推定される。現場の逆 T 型擁壁で、封かん養生が終了した後に電気抵抗の測定を行った結果を図-18 に示す。図は材齢 7 日以降のものであり、電気抵抗値は大きく変化しないのが通常である。しかし、電気抵抗値は、外気温の変化に伴って変化している。また、傾向として外気温が低下すると計測される電気抵抗値が大きくなっている。図-17 に示す現場計測での平均気温が  $16.0^\circ\text{C}$  であり、図-18 に示す現場計測での平均気温は  $10.6^\circ\text{C}$  である。また、図-17 に示す現場計測のコンクリート温度は、水和熱により外気温より高温であったと考えられる。これらの結果から電気抵抗値は、計測時の外気温に影響を受け、特に  $10^\circ\text{C}$  以下の低温になると電気抵抗値が大きくなる可能性がある。本手法を現場で適用するためには、計測される電気抵抗値を温度によって補正する必要があると考えられる。

#### 4. おわりに

以下に本実験で得られた結果を列挙する。

- (1) コンクリートの電気抵抗は W/C の影響を受け、材齢の進行に伴って W/C が小さいものほど大きくなる。
- (2) 封かん養生終了時の電気抵抗と封かん養生終了時の圧縮強度の間に相関関係が認められた。これは、単位水量が同一の場合、W/C の大小に影響を受けず、封かん養生終了時の電気抵抗値から封かん養生終了時の圧縮強度を推定できる可能性がある。
- (3) 封かん養生終了時の電気抵抗と材齢 28 日の圧縮強度の間に相関関係が認められた。これにより、封かん養生終了時の電気抵抗値から材齢 28 日の圧縮強度を推定できる可能性がある。
- (4) 封かん養生終了時の電気抵抗と材齢 91 日の圧縮強度の間に相関関係が認められた。これにより、封かん養生終了時の電気抵抗値から材齢 91 日の圧縮強度を推定できる可能性がある。
- (5) 封かん養生終了時の電気抵抗と中性化速度係数の間に相関関係が認められた。これにより、封かん養生終了時の電気抵抗から中性化速度係数を推定できる可能性がある。
- (6) 実際の現場で計測される電気抵抗値から封かん養生終了時、材齢 28 日などの圧縮強度や中性化速度係数を推定できる可能性が示された。
- (7) 電気抵抗は計測時の温度の影響を受け、特に  $10^\circ\text{C}$  以下になると電気抵抗値が大きくなる傾向を明らかにした。

#### 参考文献

- 1) 岡崎慎一郎, 八木翼, 岸利治, 矢島哲司: 養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究, セメント・コンクリート論文集, V-60, pp.227-234, 2006.2
- 2) 井ノ口公寛, 豊村恵理, 伊代田岳史: 高炉コンクリートの養生相違が乾燥の影響範囲に与える影響, 日本コンクリート工学会, 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム, pp69-74, 2011
- 3) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, 2013.3
- 4) 日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術' 11 [基礎編], 日本コンクリート工学協会, pp.169-171, 2011.2
- 5) T, Misaka. and T, Iyoda.: Study on curing of concrete by the end time judgment of the DC specific resistance, SCMT-3, e-313, August, 2013
- 6) 原沢蓉子, 三坂岳広, 一ツ柳陸, 伊代田岳史: 電気抵抗値を用いた養生期間中における強度推定手法の一提案, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, V-386, 2013.9